

晋西黄土区果农间作的种间主要竞争关系及土地生产力*

云 雷 毕华兴** 田晓玲 崔哲伟 周晖子 高路博 刘李霞

(北京林业大学水土保持学院/水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要 以晋西黄土区核桃×花生、核桃×大豆、苹果×花生和苹果×大豆 4 种典型果农间作模式为研究对象,分析果农间作模式中作物光合有效辐射(PAR)、净光合速率(P_n)、土壤水分和产量情况.结果表明:与农作物单作相比,间作模式中作物的 PAR 和 P_n 均出现不同程度的降低,并且离树体越近,PAR 和 P_n 越小; P_n 与作物产量呈显著正相关,说明光照是影响作物产量的重要因素之一;从整体趋势来看,核桃间作农作物 0~100 cm 土壤水分与相应单作模式间无明显差异,而苹果间作农作物 0~100 cm 土壤水分与相应单作模式间差异显著,说明苹果对作物土壤水分的竞争比核桃剧烈.研究区果农间作的土地利用效率平均提高 70%,经济效益平均提高 14%,且核桃间作模式优于苹果间作模式.为了提高间作作物产量,应加强水肥管理、增加树体与作物的间作距离或设置根障、定期适当修剪果树并种植耐荫作物.

关键词 果农间作 光合有效辐射 净光合速率 土壤水分 生产力

文章编号 1001-9332(2011)05-1225-08 **中图分类号** S181,S152.7 **文献标识码** A

Main interspecific competition and land productivity of fruit-crop intercropping in Loess Region of West Shanxi. YUN Lei, BI Hua-xing, TIAN Xiao-ling, CUI Zhe-wei, ZHOU Hui-zi, GAO Lu-bo, LIU Li-xia (*Ministry of Education Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(5): 1225-1232.

Abstract: Taking the four typical fruit-crop intercropping models, *i. e.*, walnut-peanut, walnut-soybean, apple-peanut, and apple-soybean, in the Loess Region of western Shanxi Province as the objects, this paper analyzed the crop (peanut and soybean) photosynthetic active radiation (PAR), net photosynthetic rate (P_n), yield, and soil moisture content. Comparing with crop monoculture, fruit-crop intercropping decreased the crop PAR and P_n . The smaller the distance from tree rows, the smaller the crop PAR and P_n . There was a significantly positive correlation between the P_n and crop yield, suggesting that illumination was one of the key factors affecting crop yield. From the whole trend, the 0-100 cm soil moisture content had no significant differences between walnut-crop intercropping systems and corresponding monoculture cropping systems, but had significant differences between apple-crop intercropping systems and corresponding monoculture cropping systems, indicating that the competition for soil moisture was more intense in apple-crop intercropping systems than in walnut-crop intercropping systems. Comparing with monoculture, fruit-crop intercropping increased the land use efficiency and economic benefit averagely by 70% and 14%, respectively, and walnut-crop intercropping was much better than apple-crop intercropping. To increase the crop yield in fruit-crop intercropping systems, the following strategies should be taken: strengthening the management of irrigation and fertilization, increasing the distances or setting root barriers between crop and tree rows, regularly and properly pruning, and planting shade-tolerant crops in intercropping.

Key words: fruit-crop intercropping; photosynthetic active radiation; net photosynthetic rate; soil moisture content; productivity.

* “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD38B02)和北京林业大学科技创新计划项目(HJ2010-24)资助.

** 通讯作者. E-mail: bhx@bjfu.edu.cn

2010-09-27 收稿, 2011-02-20 接受.

果农间作是农林复合系统的主要模式之一. 果树具有较高的经济收益,深受农民欢迎,但将果树与作物进行间作将可能产生种间竞争. 目前,对于农林复合系统种间关系的研究已取得了一系列成果,部分研究表明农林间作会造成作物减产,作物减产的原因主要分为地上遮光^[1-4]和地下竞争^[5-8]两方面. 一般认为,在湿润地区,农林复合系统地上部分对光的竞争可能是系统生产力的主要决定因素^[9];在温带地区和半干旱热带地区,地下部分对水分的竞争可能限制系统生产力^[10-12]. 目前,对晋西黄土区基于种间关系及土地生产力的果农间作模式筛选仍缺乏一定的理论依据^[13]. 如何减少竞争、有效利用土地、提高土地生产力以及增加农民经济效益是农林复合系统可持续发展的重要研究课题. 本文以晋西黄土区典型果农间作为研究对象,对其光能、土壤水分、产量和经济效益进行研究,旨在探索果树与农作物间作的相互作用机制,使树木和作物之间的资源竞争最小化、资源利用最大化,为该地区农林复合的调控和管理技术的制定提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

山西省吉县(35°53′—36°21′N, 110°27′—111°7′E)属典型的黄土残塬沟壑区. 该区年均降水量571 mm,降水量季节分配不均,4—10月降水量(521.4 mm)占全年降水量的90.5%,6—9月降水量占全年降水量的70%左右,冬季(12月至次年2月)降水量(16.7 mm)占全年降水量的3%. 土壤为黄土母质,土层深厚,土质均匀,在剖面不同深度分布有钙积层石灰结核或假菌丝体. 吉县境内植物资源比较丰富,常见的木本植物194种,隶属于49个科,草本植物180种,隶属于44个科(不包括农作物). 主要造林树种为侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoscacia*)、苹果(*Malus pumila*)和核桃(*Juglans regia*)等.

1.2 研究方法

1.2.1 复合类型的选择 根据黄土残塬沟壑区农林复合经营特点,结合当地农村实际种植情况,在山西省吉县东城乡雷家庄残塬面建立以核桃、苹果为主的果农间作模式试验示范区,选取核桃×花生、核桃×大豆、苹果×花生、苹果×大豆4种典型间作模式. 每种模式3个试验小区,核桃间作和单作的小区面积均为400 m²,苹果间作和单作小区面积均为300 m². 核桃、苹果示范区总面积分别为6300 m²和

4500 m². 在示范区选择单行带的核桃间作、苹果间作模式为研究对象,行带内间作农作物,并设置单作核桃和苹果为对照. 核桃和苹果均始栽植于2000年,树带行向与作物行向相同,基本为东西走向,苹果和核桃的基本特征见表1. 间作模式中花生、大豆的株行距均为0.45 m×0.50 m,株行距、密度和管理方式与当地单作花生、大豆的生产方式一致. 核桃、苹果与作物之间的距离分别为1 m和2 m.

1.2.2 光合作用的测定 2009年8月,在花生结荚期和大豆结荚期,选择晴朗无云的天气,利用Li-6400便携式光合测定系统测定各植物的净光合速率(P_n , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、光合有效辐射(PAR, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)以及相关环境因子. 测定时间为8:00—18:00,每2 h测定1次. 在垂直于核桃树行方向的东西两侧1.5、2.5和3.5 m处(距核桃树由近及远的第2行、第4行和第6行)和垂直于苹果树行方向的东西两侧2.0 m处,选取具有代表性的花生、大豆. 其中核桃间作选取花生、大豆各18株,苹果间作选取花生、大豆各6株,每株选取长势相近、充分伸展、无病虫害的健康叶3片,每个指标重复测定3次,每次记录3个数据,取平均值. 单作花生、大豆(单作作物小区面积均为667 m²)按照“S”型各选取5株,选取标准和测定方式与间作一致.

1.2.3 土壤水分的测定 核桃×农作物间作土壤水分取样点布设采用样线法,以核桃中央林带为中心(定义核桃树下为距林带0 m),每个小区各设1条垂直中央林带的样线,在样线上每隔0.5 m设取样点,每条样线上共15个取样点,每种核桃间作模式共45个取样点(图1). 苹果×农作物间作取样点布设也采用样线法,每个小区设11个取样点,每种苹果间作模式共33个取样点. 每个对照作物样地均按“S”型布设5个取样点取土样,每个土样3次重复.

2009年8月,用土钻取土,取土深度为0~100 cm,每20 cm为一层,用烘干法分层测定土壤含水量.

表1 试验区核桃和苹果的基本特征
Table 1 Characteristics of walnut trees and apple trees in test area

树种 Species	株行距 Planting space (m)	密度 Density ($\text{ind} \cdot \text{hm}^{-2}$)	树高 Tree height (m)	胸径 Diameter at breast height (cm)	冠幅半径 Radius of crown (m)
核桃 Walnut	6.5×6.5	236	4.2	11.23	2.1
苹果 Apple	3.0×4.0	750	4.0	11.66	2.1

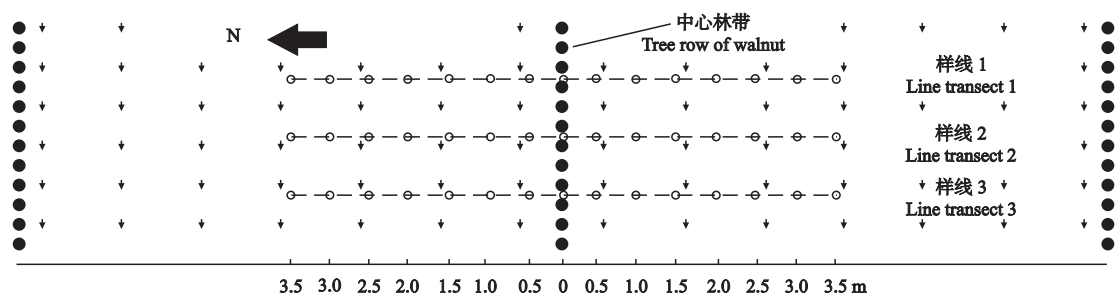


图1 核桃×农作物间作的土壤水分监测点

Fig.1 Sampling sites for soil moisture monitoring of walnut-crop intercropping.

●核桃树 Walnut; ↓作物 Crop; ○取样点 Sampling point; ——样线 Line transect.

1.2.4 产量的测定 在2009年生长期季末收取农作物. 由于核桃树和苹果树的株行距(表1)及其与作物距离的差异,因此不同果树间作模式的样方大小不同. 在核桃树行2侧分别按照离树体由近及远方向依次选取3个6 m×1 m样方;在苹果树行两侧分别取1个3 m×1 m样方. 采集的花生、大豆在70℃烘至恒量,用精度0.01 g的电子天平称量. 取每种模式3个试验小区的平均值.

在果实收获期,调查每个间作试验区 and 单作试验区内20棵标准苹果树和核桃树的全部果实,计数并称量,测定其产量.

1.2.5 土地当量比和收益当量比 用土地当量比(LE_R)和收益当量比(IE_R)可更好地判断农林复合系统效果,其计算公式如下:

$$LE_R = \frac{P_1}{M_1} + \frac{P_2}{M_2} \tag{1}$$

式中: P_1 为间作模式中苹果树或核桃树单位面积果实产量; P_2 为间作模式中农作物单位面积产量; M_1 为单作模式中苹果树或核桃树单位面积果实产量; M_2 为单作模式中农作物单位面积产量.

$$IE_R = \frac{aP_1 + bP_2}{\max\{aM_1, bM_2\}} \tag{2}$$

式中: a 为苹果或核桃的单位价格; b 为农作物的单位价格.

LE_R和IE_R的临界值均为1.0,若大于1.0,说明间作有利,若小于1.0,表明单作有利.

1.3 数据处理

采用Excel 2003对数据进行统计,用SPSS 15.0软件进行方差分析(Turkey HSD)和相关分析.

2 结果与分析

2.1 不同间作模式农作物光合有效辐射的日变化

不同间作模式下,结荚期花生和大豆的光合有效辐射具有一定的相似性,距核桃树2.5 m、3.5 m和距苹果树2.0 m的花生、大豆光合有效辐射的日

变化均为“单峰型”曲线,且最大值均出现在12:00;距核桃树1.5 m的花生和大豆光合有效辐射日变化为“双峰型”曲线,其中波峰之间的低谷出现在12:00(图2). 果树×农作物间作模式下,距果树不同距离的农作物光合有效辐射依次为:距核桃树3.5 m>距核桃树2.5 m>距苹果树2.0 m>距核桃树1.5 m,即随着作物与果树间距离的逐渐增大,作物的光合有效辐射逐渐增强,这与果树对作物的遮荫程度和遮荫时间有关.

2.2 不同间作模式农作物净光合速率的日变化

在花生结荚期,除距苹果树2.0 m处外,其他间

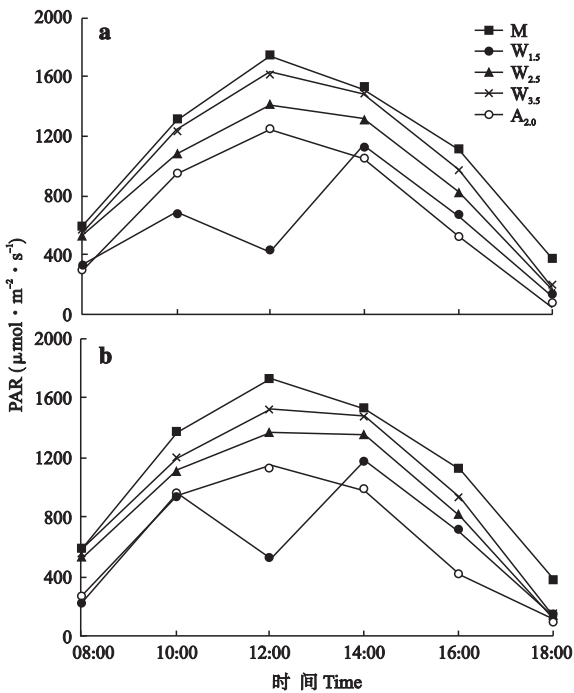


图2 不同间作模式下花生(a)和大豆(b)光合有效辐射(PAR)的日变化

Fig.2 Diurnal changes of PAR of peanut (a) and soybean (b) under different intercropping patterns.

M:单作 Monoculture; W_{1.5}:距核桃1.5 m 1.5 m from walnut; W_{2.5}:距核桃2.5 m 2.5 m from walnut; W_{3.5}:距核桃3.5 m 3.5 m from walnut; A_{2.0}:距苹果2.0 m 2.0 m from apple. 下同 The same below.

作模式下花生净光合速率的日变化均呈“双峰型”曲线,净光合速率峰值分别出现在 10:00 和 14:00, 12:00 时的净光合速率明显减小,此时单作以及距核桃树 1.5 m、2.5 m、3.5 m 处花生净光合速率分别为 11.98、8.91、13.30 和 12.15 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;距苹果树 2.0 m 处,花生净光合速率日变化呈“单峰型”曲线,峰值出现在 12:00,为 14.11 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3). 不同间作模式下,花生净光合速率的日均值表现为单作 (11.71 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 距核桃树 3.5 m (11.23 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 距核桃树 2.5 m (9.88 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 距苹果树 2.0 m (8.62 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 距核桃树 1.5 m (8.18 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 在大豆结荚期,除距苹果树 2.0 m 处外,其他间作模式下大豆净光合速率的日变化呈“双峰型”曲线,峰值分别出现在 10:00 和 16:00,14:00 时的净光合速率最小,此时单作以及距核桃树 1.5 m、2.5 m、3.5 m 处大豆净光合速率分别为 6.43、5.10、5.50 和 6.39 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;距苹果树 2.0 m 处,大豆净光合速率日变化呈“单峰型”曲线,峰值出现在 12:00,为 13.14 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3). 不同间作模式下,大豆净光合速率的日均值表现为单作 (9.73 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 距核桃树 3.5 m (8.98 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) > 距核桃树 2.5 m (7.99 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

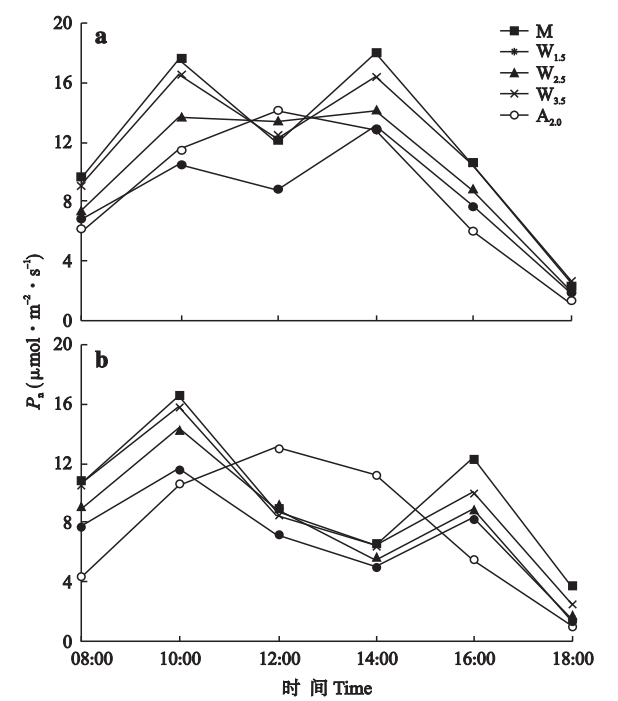


图 3 不同间作模式下花生(a)和大豆(b)净光合速率(P_n)的日变化

Fig. 3 Diurnal changes of P_n of peanut (a) and soybean (b) under different intercropping patterns.

>距苹果树 2.0 m (7.60 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) >距核桃树 1.5 m (6.93 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

从图 2、图 3 可以看出,单作模式和部分间作模式(距离核桃树 3.5 m、2.5 m 的花生和大豆)都不同程度地呈现“午休”现象;核桃×农作物间作模式下,距离核桃树 1.5 m 的花生和大豆净光合速率日变化呈双峰曲线;苹果×农作物间作模式下,距苹果树 2.0 m 的花生和大豆净光合速率的日变化虽然表现为单峰曲线,没有出现明显的“午休”现象,但树体的遮光使其净光合速率仍然小于单作. 方差分析结果表明,花生和大豆在不同间作模式下的净光合速率均存在显著差异 ($P < 0.05$).

2.3 土壤水分含量分布特征

2.3.1 核桃×农作物间作模式土壤水分的分布特征

由于核桃树株行距较大,且核桃树与作物之间距离较近,10 行作物种于核桃树行之间,分析核桃×农作物间作模式土壤水分分布特征,可以看出间作模式中不同位置作物的土壤含水量变化. 而苹果树株行距较小,且苹果树与作物之间距离较远,分析苹果×农作物间作模式土壤水分分布特征,无法看出间作模式中不同位置作物土壤含水量变化. 故本文仅分析核桃×农作物间作模式土壤水分分布特征.

垂直方向,核桃×花生和核桃×大豆间作土壤水分含量均随着土壤深度的增加而增大;水平方向,距核桃树越近,2 种间作的土壤水分含量越少,随着带距的增加,土壤水分增加直至趋于稳定;核桃×花生间作的土壤含水量平均值大于核桃×大豆间作 (图 4). 由于本文间作模式设置核桃与花生和大豆的距离均为 1 m,故将 [0, 1 m) 范围定义为林带区,

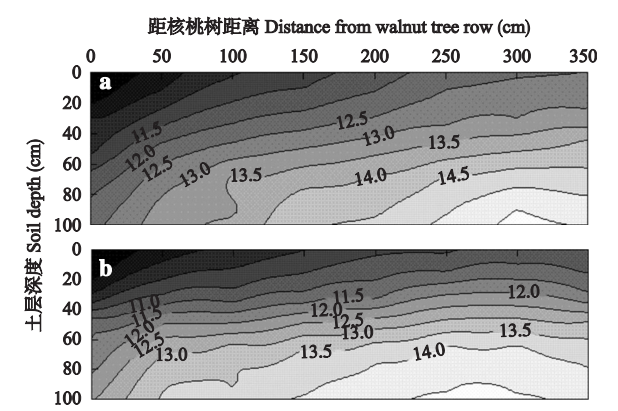


图 4 核桃-花生(a)和核桃-大豆(b)间作土壤水分含量(%)的二维等值线图

Fig. 4 Two-dimensional isogram of soil moisture content (%) under walnut-peanut (a) and walnut-soybean (b) intercroppings.

[1 m,3.5 m]范围视为作物区.核桃×花生和核桃×大豆间作模式下,林带区、作物区的土壤水分分别为11.6%、13.4%和11.4%、12.6%.林带区水分较低,是由于核桃根系集中所致,而随着带距的增加土壤水分增加直至趋于稳定,原因在于随着与树干距离的增加,核桃各级根系数量均逐渐减少^[14].除了树体根系数量和分布,土壤水分的变化还与作物盖度、光照等因素有关.

对核桃×花生和核桃×大豆间作模式分别进行土壤水分含量与距树体距离、土层深度进行多元非线性回归分析,其方程如下:

$$M_{S1} = -4.5 \times 10^{-8} Z^4 + 0.001 Z^2 - 2.2 \times 10^{-5} D^2 + 0.016 D + 9.676, r' = 0.902 \quad (P < 0.01) \quad (3)$$

$$M_{S2} = -1.3 \times 10^{-5} Z^3 + 0.002 Z^2 - 2.6 \times 10^{-5} D^2 + 0.015 D + 8.586, r' = 0.900 \quad (P < 0.01) \quad (4)$$

式中: M_{S1} 和 M_{S2} 为核桃×花生和核桃×大豆间作模式的土壤质量含水量(%); D 为距树体距离(cm); Z 为土层深度(cm); r' 为复相关系数.

2.3.2 不同间作模式农作物土壤水分含量的比较
由表2可以看出,不同间作模式下农作物0~100 cm土层平均土壤含水量的大小依次为:核桃×花生间作(13.4%)>花生单作(12.9%)>苹果×花生间作(10.1%),大豆单作(13.1%)>核桃×大豆间作(12.6%)>苹果×大豆间作(10.2%);0~100 cm土层,从整体趋势来看,核桃×农作物间作的土壤水

分与相应单作模式均没有明显差异,而苹果×农作物间作的土壤水分与相应单作模式差异显著.核桃×农作物间作模式中,由于核桃树种植株行距较大,虽然距树体较近的作物受到核桃根系影响而导致土壤水分较小(图4),但总体土壤水分与单作模式差异不显著;苹果×农作物间作模式中,由于苹果树种植密度较大,导致农作物土壤水分受苹果树根系影响较大.

2.4 不同间作模式的产量效应、土地利用效应和经济效益

间作模式中,随着距树体距离的增加,作物产量有所增加,反映出果树对作物产量的竞争(表3).总体上,核桃×花生间作和苹果×花生间作的花生产量比单作花生分别降低18.3%和41.9%;核桃×大豆间作和苹果×大豆间作的大豆产量比大豆单作分别降低23.3%和38.6%(表4).

与单作模式相比,各间作模式的土地利用效率(表4)和经济效益(表5)均有不同程度的提高;与核桃间作的各模式的土地利用效率均高于与苹果间作的不同模式.核桃×花生间作的土地利用效率大于核桃×大豆间作;苹果×大豆间作的土地利用效率大于苹果×花生间作.在所有间作模式的土地利用效率中,核桃×花生间作(1.78)>核桃×大豆间作(1.71)>苹果×大豆间作(1.69)>苹果×花生间作(1.63),与单作模式相比,这4种间作模式的土地

表2 不同间作模式下农作物土壤水分含量
Table 2 Soil moisture content of crop in different intercropping patterns (%)

作物 Crop	间作模式 Intercropping pattern	土壤深度 Soil depth (cm)				
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
花生 Peanut	核桃×花生 Walnut-peanut	12.1a	12.6a	13.5a	14.3a	14.7a
	苹果×花生 Apple-peanut	8.7b	9.9b	11.5b	10.6b	9.8b
	花生单作 Peanut monoculture	11.7a	12.5a	13.0ab	13.3a	13.8a
大豆 Soybean	核桃×大豆 Walnut-soybean	10.6a	11.4b	12.9a	13.9a	14.1a
	苹果×大豆 Apple-soybean	9.8a	10.2c	10.7b	10.4b	9.7b
	大豆单作 Soybean monoculture	10.2a	12.8a	14.0a	14.6a	14.0a

不同字母表示相同土层不同间作模式间差异显著($P<0.05$) Different letters indicated significant difference among different intercropping patterns in the same soil layer at 0.05 level.

表3 距核桃树不同距离的作物产量
Table 3 Yield of crops in different distances to walnut tree ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

模式 Pattern	距核桃树距离 Distance to walnut tree		
	D ₁	D ₂	D ₃
核桃×花生 Walnut-peanut	1220.05	1536.92	1753.21
核桃×大豆 Walnut-soybean	1160.50	1459.99	1684.60

D₁~D₃表示距树体的距离由近及远 D₁~D₃ indicated the distance to walnut tree from near to far.

利用效率平均提高70%.不同间作模式的收益当量比从大到小依次为核桃×大豆间作(1.20)、核桃×花生间作(1.13)、苹果×大豆间作(1.12)和苹果×花生间作(1.10),经济效益平均提高14%.

对耕地资源相对紧张的晋西黄土区而言,间作模式所产生的土地利用效应无疑具有重要的现实意义.晋西黄土区核桃×花生、核桃×大豆、苹果×花生和苹果×大豆间作模式的经济效益表明,这几种间

表 4 不同间作模式的产量效应和土地利用效应
Table 4 Yield effects and land use effects in different intercropping patterns

模式 Pattern	间作模式 Intercropping pattern		单作模式 Monoculture pattern		土地当量比 LER
	果树产量	作物产量	果树产量	作物产量	
	Yield of fruit (kg · hm ⁻²)	Yield of crop (kg · hm ⁻²)	Yield of fruit (kg · hm ⁻²)	Yield of crop (kg · hm ⁻²)	
核桃×花生 Walnut-peanut	410. 64	1507. 92	424. 80	1845. 48	1. 78
核桃×大豆 Walnut-soybean	401. 20	1439. 80	424. 80	1871. 78	1. 71
苹果×花生 Apple-peanut	34766. 33	1072. 53	33284. 85	1845. 48	1. 63
苹果×大豆 Apple-soybean	35954. 01	1150. 24	33284. 85	1871. 78	1. 69

表 5 不同间作模式的经济效益
Table 5 Economic benefits in different intercropping patterns

模式 Pattern	间作模式 Intercropping pattern		单作模式 Monoculture pattern		收益当量比 IER
	果树收入	作物收入	果树收入	作物收入	
	Income of fruit (yuan · hm ⁻²)	Income of crop (yuan · hm ⁻²)	Income of fruit (yuan · hm ⁻²)	Income of crop (yuan · hm ⁻²)	
核桃×花生 Walnut-peanut	4106. 40	10555. 44	4248. 00	12918. 36	1. 13
核桃×大豆 Walnut-soybean	4012. 00	7198. 99	4248. 00	9358. 89	1. 20
苹果×花生 Apple-peanut	139065. 30	7507. 74	133139. 40	12918. 36	1. 10
苹果×大豆 Apple-soybean	143744. 31	5751. 21	133139. 40	9358. 89	1. 12

经济效益按照当地经济标准计算^[10] Economic benefits were calculated with local economic standard^[10]. 大豆、花生、苹果和核桃单价分别为每公斤 5、7、4 和 10 元 Price of soybean, peanut, apple and walnut were 5, 7, 4 and 10 yuan · kg⁻¹, respectively.

作模式可以作为该区的主要果农间作模式,可以广泛应用于实践,其中,核桃间作模式优于苹果间作模式.

3 讨 论

从土地利用效率和经济效益来看,本文中这几种间作模式均适合该地区的生产实践,但间作模式对农作物减产所造成的负面影响也不容忽视.

果树的株行距、高度、冠幅等因素直接影响光照强度. 本文中单作模式和部分间作模式都不同程度呈现出明显的“午休”现象,午休现象是植物在高温强光天气下出现的普遍现象^[15],它可能由气孔导度引起^[16],也可能由长时间高光强下所发生的光抑制引起^[17-18],目前说法不一. 遮光在一定程度上避免“午休”现象的同时,也影响作物的净光合速率,从而影响光合作用物质的累积. 本试验结果表明,随着与果树距离的增加,作物光合有效辐射和净光合速率都逐渐增大. 花生($R=0.919, P<0.01$)、大豆产量($R=0.904, P<0.01$)均与净光合速率呈极显著正相关,说明林木遮光是作物减产的主要原因之一. 许多农林复合系统中,木本植物林冠层的光拦截作用改变了入射光质量并降低农作物的光合有效辐射,从而导致农作物产量降低^[1,3,19-20],并且随着作物与木本植物距离的增加,光竞争作用减小,作物产量增加,位于树行中心的作物产量最高^[4,21-22].

从整体趋势来看,核桃×农作物间作 0 ~ 100 cm

土层的土壤水分与相应单作模式间没有明显差异,而苹果×农作物间作则明显小于相应单作模式. 距核桃树较近的作物受到核桃根系的影响,土壤水分较小(图 4),相对而言,苹果×农作物间作中作物受苹果树体的影响更大,竞争更激烈. 张劲松和孟平^[23]通过对苹果×小麦间作模式的研究发现,苹果树所消耗的土壤水分至少有 50% 以上来自作物区,说明土壤水分也是影响作物产量的原因之一.

在认识果树-作物间作模式下各种竞争关系的基础上,如何调控、减少竞争以及增加互补,使系统向有利的方向发展,从而提高经济产量和效益是当地农民关注的问题. 在农林复合系统的地上部分,可以通过剪枝、选择耐荫能力强的物种、增加行间距等一系列管理措施减轻农林复合系统组分对光能的竞争,提高作物产量. 对木本植物修剪后,高粱 (*Manihot esculenta*) 和豇豆 (*Cajanus cajan*) 产量可增长 1 倍以上^[12]. 王兴祥等^[2]对南酸枣间作系统进行定期剪枝后,花生的光合有效辐射和产量均有所提高. 孙尚伟等^[24]研究结果表明,杨树适当修剪可有效增加林下的玉米产量. Pinto 等^[25]研究发现,咖啡 (*Coffea* spp.) 树密度保持不变条件下,遮光水平在 30% ~ 45% 时的咖啡树产量最大. 张劲松等^[26]对苹果-生姜复合系统的研究发现,不同复合模式中生姜产量均有不同程度的提高. Wu 和 Zhu^[27]研究发现,农林复合系统中的林木行距是决定树荫对林下作物影响的关键因素,适宜的行距会造成双赢的结果. 本研究

中,核桃间作模式的行距优于苹果间作模式. 农林复合系统的地下部分可以通过树种的合理选择与搭配、埋设根障、施肥等方法降低复合系统土壤水分和养分的竞争. Hirota 等^[28]利用分根系统对老猫尾木 (*Markhamia lutea*) 的水力提升作用进行研究发现,旱稻 (*Oryza sativa*) 周围土壤含水量增加,降低了水分竞争,促进了旱稻生长. Wanvestraut 等^[29]采用放置聚乙烯屏障的方法研究美洲山核桃 (*Carya illinoensis*) 对棉花 (*Gossypium hirsutum*) 水分的竞争,发现屏障处理后,棉花土壤含水量、产量和生长状况出现明显增加和改善. 本研究结果表明,不同间作模式下,离树体越近,土壤水分竞争越激烈,这与云雷等^[30]研究结果一致,可通过设置根障或增加树体与作物间距的方法来减少树体对作物的竞争影响.

晋西黄土区果农间作模式的总生产力是地上和地下部分竞争的综合结果. 对于本文中的几种间作模式,应加强日常的水肥管理、调整树木株行距,增加树体和作物的复合距离、设置根障、在保证林冠功能的前提下对果树进行定期适当修剪或种植耐荫农作物等,以提高间作产量,从而更好地实现果农间作系统功能,最大程度地提高生态、经济和社会效益,充分发挥果农间作系统的优势.

参考文献

- [1] Osman M, Emmingham WH, Sharrow SH. Growth and yield of sorghum or cowpea in an agrisilviculture system in semiarid India. *Agroforestry Systems*, 1998, **42**: 91–105
- [2] Wang X-X (王兴祥), He Y-Q (何园球), Zhang T-L (张桃林), et al. *Choerospondias axillaris* and peanut (*Archis hypogaea*) alley cropping systems on udic ferrosol in subtropical China. IV. Competition for light and role of tree pruning. *Soils* (土壤), 2003, **35** (4): 320–324 (in Chinese)
- [3] Sudmeyer RA, Speijers J. Influence of windbreak orientation, shade and rainfall interception on wheat and lupin growth in the absence of below-ground competition. *Agroforestry Systems*, 2007, **71**: 201–214
- [4] Peng XB, Zhang YY, Cai J, et al. Photosynthesis, growth and yield of soybean and maize in a tree-based agroforestry intercropping system on the Loess Plateau. *Agroforestry Systems*, 2009, **76**: 569–577
- [5] Monteith JL, Ong CK, Corlett JE. Microclimatic interactions in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, 1991, **45**: 31–44
- [6] Ong CK, Corlett JE, Singh RP. Above and below ground interaction in agroforestry systems. *Forest Ecology and Management*, 1991, **45**: 45–57
- [7] Cai C-F (蔡崇法), Wang F (王 峰), Ding S-W (丁树文), et al. Nutrients competition and its action

- mechanism between component parts in inter cropping systems and agroforestry. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2000, **7** (3): 219–222 (in Chinese)
- [8] Wang X-X (王兴祥), Zhang T-L (张桃林), Zhang B (张 斌), et al. *Choerospondias axillaris* and peanut (*Archis hypogaea*) alley cropping systems on udic ferrosol in subtropical China. II. Competition for N. *Soils* (土壤), 2003, **35** (1): 66–68 (in Chinese)
- [9] Friday JB, Fownes JH. Competition for light between hedgerows and maize in an alley cropping system in Hawaii, USA. *Agroforestry Systems*, 2002, **55**: 125–137
- [10] Singh RP, Ong CK, Saharan N. Above and below ground interactions in alley-cropping in semi-arid India. *Agroforestry Systems*, 1989, **9**: 259–274
- [11] Rao MR, Ong CK, Pathak P, et al. Productivity of annual cropping and agroforestry systems on a shallow Alfisol in semi-arid India. *Agroforestry Systems*, 1991, **15**: 51–63
- [12] Jose S, Gillespie AR, Seifert JR, et al. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the Midwestern USA: 2. Competition for water. *Agroforestry Systems*, 2000, **48**: 41–59
- [13] Shi X-L (史晓丽), Guo X-P (郭小平), Bi H-X (毕华兴), et al. Light competition and yield of fruit-crop intercropping system in western Shanxi Province. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2009, **31** (Suppl. 2): 115–118 (in Chinese)
- [14] Yun L (云 雷), Bi H-X (毕华兴), Ma W-J (马雯静), et al. Spatial distribution characteristics of root system of walnut trees in the walnut-peanut intercropping system in the Loess Region of western Shanxi. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2010, **38** (7): 67–70 (in Chinese)
- [15] Ke S-S (柯世省), Jin Z-X (金则新), Chen X-T (陈贤田). Photo-ecological characteristics of six broad-leaved species including *Heptacodium miconioides* in the Tiantai Mountains in Zhejiang Province. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2002, **26** (3): 363–371 (in Chinese)
- [16] Pan R-C (潘瑞炽). *Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [17] Xu D-Q (许大全). Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), 1997, **33** (4): 241–244 (in Chinese)
- [18] Xu D-Q (许大全). Several problems in the research of plant light stress. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), 2003, **39** (5): 493–495 (in Chinese)
- [19] Gao G-Z (高国治), Wang M-Z (王明珠), Zhang B (张 斌). Competition of the light, fertilizer and water between *Choerospondias axillaris* trees and peanut in the red soil of low hilly land. II. Analysis of using light energy of *Choerospondias axillaris* trees and peanut. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2004, **12** (2): 92–94 (in Chinese)

[20] Zhao Y (赵 英), Zhang B (张 斌), Wang M-Z (王明珠). Assessment of competition for water, fertilizer and light between components in the alley cropping system. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26** (6): 1792–1801 (in Chinese)

[21] Noordwijk MV, Lusiana B. WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 1998, **43**: 217–242

[22] Imo M, Timmer VR. Vector competition analysis of a Leucaena-maize alley cropping system in western Kenya. *Forest Ecology and Management*, 2000, **126**: 255–268

[23] Zhang J-S (张劲松), Meng P (孟 平). Simulation on water ecological characteristics of agroforestry in the hilly area of Taihang Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(6): 1172–1177 (in Chinese)

[24] Sun S-W (孙尚伟), Yin W-L (尹伟伦), Xia X-L (夏新莉), *et al.* Effects of different pruning intensity on microclimate, growth and yield of crops in agroforestry system. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2009, **31**(1): 25–30 (in Chinese)

[25] Pinto LS, Perfecto I, Hernandez JC, *et al.* Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, **80**: 61–69

[26] Zhang J-S (张劲松), Meng P (孟 平), Xin X-B (辛学兵), *et al.* Effects of apple-ginger intercropping in the hilly land of Taihang Mountain. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2001, **37**(2): 74–78 (in Chinese)

[27] Wu YY, Zhu ZH. Temperate agroforestry in China// Gordon AM, Newman SM, eds. *Temperate Agroforestry Systems*. Wallingford, UK: CAB International Press, 1997: 149–179

[28] Hirota I, Sakuratani T, Sato T, *et al.* A split-root apparatus for examining the effects of hydraulic lift by trees on the water status of neighbouring crops. *Agroforestry Systems*, 2004, **60**: 181–187

[29] Wanvestraut RH, Jose S, Nair PKR, *et al.* Competition for water in a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Agroforestry Systems*, 2004, **60**: 167–179

[30] Yun L (云 雷), Bi H-X (毕华兴), Ren Y (任 怡), *et al.* Soil moisture distribution at fruit-crop intercropping boundary in the loess Region of western Shanxi. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2009, **37**(9): 70–73 (in Chinese)

作者简介 云 雷,男,1982 年生,博士研究生.主要从事复合农林学研究,发表论文 20 余篇. E-mail: lepidus_qq@126.com

责任编辑 杨 弘
